

黄、东海水母暴发机理及其生态 环境效应研究进展*

孙 松^{1,2} 于志刚³ 李超伦¹ 黄邦钦⁴
庄志猛⁵ 魏 皓⁶ 孙晓霞²

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 青岛 266071; 3. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室 青岛 266100; 4. 厦门大学环境与生态学院 近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门 361005; 5. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 6. 天津科技大学海洋科学与工程学院 天津 300457)

提要 在全球变化和人类活动影响下海洋生态系统的结构与功能发生了很大的变化, 海洋赤潮、绿潮、白潮(水母暴发)等生态灾害在多重压力下不断出现。对于以水母为代表的胶质类生物的数量增多, 国际上有很多的解释和争论: 水母的暴发是一种趋势性的还是周期性的现象, 关键问题是对导致水母暴发原因的认识。针对这些问题, 国家重点基础研究发展计划项目“中国近海水母暴发的关键过程、机理及生态环境效应”开展了综合性的研究, 对前期的研究进展和结果进行系统整理发表在本专辑中, 涉及水母生活史策略、环境因子对水母不同生活史阶段的生长和发育的影响、水母的暴发对环境的影响、以及对中国近海水母暴发的新认知等。

关键词 水母暴发, 生态系统演变, 生态灾害

中图分类号 Q178.1; Q958.885.3

全球变化是一个受到广泛关注的话题, 全球变化下的海洋生态系统在多重压力下发生了很多的变化, 其中一个引人注意的问题是海洋生态灾害的频发: 有害赤潮发生的频率和范围不断增加和扩大, 2007 年开始在北黄海又出现了底栖藻类(浒苔)大量漂浮到水体中并聚集为绿潮的现象, 对近海生态系统健康造成很大压力和威胁, 最近几年在渤海和胶东半岛沿岸还出现微型藻类暴发的现象, 对当地的海水养殖业造成极大破坏。上述生态灾害的肇事者主要是藻类生物的大量暴发引起的(有些属于原生动物), 但在过去 20 年间人们忽然发现海洋中的胶质类生物(水母、栉水母、被囊类等)明显增多, 特别是水母类生物在世界许多海域出现的种群暴发现象(Vinogradov *et al*, 1989; Lotan *et al*, 1994; Brodeur *et al*, 1999; Uye *et al*, 2004)。水母的暴发导致一系列的经济和社会问

题, 被认为是一种非常严重的、由于海洋动物的暴发而形成的生态灾害。

水母在近海、特别是近岸的暴发引起社会和媒体的极大关注, 一些核电站由于水母的暴发导致海水冷却系统堵塞而停止运转, 仅 2011 年就发生了日本、以色列和苏格兰的核电站由于水母的暴发导致停止运行的事件, 这样的事件在近几年不断发生。因为很多水母带有刺细胞, 可对人体造成伤害, 甚至经常发生游客被水母蛰死的事件, 因此水母的暴发对旅游业也造成了很大的影响, 一些沿海的旅游设施由于水母的暴发而关闭。水母的暴发也给海洋生态系统健康造成很大影响, 很多生态学家认为, 由于水母的持续增加, 水母有可能取代鱼类等大型生物成为生态系统的主导性生物, 对海洋生态系统健康带来极大危害, 甚至会导致生态系统的灾难(Jackson *et al*,

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2011CB403601 号。孙 松, 博士, 研究员, E-mail: sunsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2011-12-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

2001; Richardson *et al.*, 2009)。但最近 Condon 等(2012)在 BioScience 上发表了一篇综述性文章, 认为水母将来未必会成为海洋生态系统的统治者, 目前缺乏足够的证据说明全球水母的增加是趋势性的还是阶段性的, 也许只是海洋生态系统的一个周期性的变化, 因为在历史上也曾经发生过多次水母暴发的现象, 目前水母的数量增加是由于全球气候变化和人类活动共同作用下海洋生态系统的一个综合反应, 海洋生态系统未来的变化趋势还有待于进行深入研究, 现在不足以做出一些结论性的判断。英国自然杂志也刊登了一篇文章对这个问题进行评述(Schrope, 2012), 认为水母暴发的问题非常复杂, 需要进行大量的实验和海洋调查以弥补在数据和证据方面的不足, 现在下结论为时过早。

水母是海洋生态系统中的重要组成部分, 主要食物是海洋中的浮游动物, 与鱼类等生物进行饵料竞争, 也会摄食鱼类的卵和幼体, 水母的数量增多将对海洋生态系统的结构与功能产生重要的影响, 也将对渔业资源造成破坏, 使渔业资源长期得不到恢复。针对水母暴发的基础生物学、生态学、发生机理和生态效应等问题, 我国在 2011 年启动了国家重点基础研究发展计划项目: “中国近海水母暴发的关键过程、机理及生态环境效应”, 通过大量的文献分析、历史资料综合分析、海洋综合考察和实验生态学研究, 对水母暴发的关键过程、机理和生态效应有了初步的认识, 取得了一些阶段性的成果和突破性的进展。本专辑是对前期研究的初步总结, 涉及到水母生活史研究、环境变化与水母生殖策略、水母暴发与海洋食物网变动的关系、物理过程对水母分布格局的影响以及中国近海水母暴发的机理的探讨与理论框架的提出等各个方面。

水母属于肠腔动物, 通常人们所指的水母包括两大类, 一类是带有刺细胞的水母, 例如海月水母(*Aurelia* spp.)、海蜇(*Rhopilema esculentum*)、沙蜇(*Nemopilema nomurai*)和霞水母(*Cyanea* spp.)等; 另一类是不带刺细胞的水母, 身体上带有像梳子一样的纤毛, 例如侧腕栉水母(*Pleurobrachia pileus*)和瓜水母(*Beroe cucumis*)等。尽管水母的身体柔软、不带骨骼, 但仍然能够发现很多古生物学的证据: 从已有的古生物学记录来看, 在 5.4 亿年之前, 也就是寒武纪早期就出现了栉水母(Chen *et al.*, 2007), 其它水母约在寒武纪中后期至 5.4—5.2 亿年之前出现(Hagadorn *et al.*, 2002), 所以说水母是地球上最古老

的生物之一, 它们在海洋中已经生存了超过 5 亿年的时间。在漫长的历史长河中, 水母经过了地球上几次大的极端环境的考验, 在这些过程中一些曾经在地球上非常繁茂的生物, 例如三叶虫、鹦鹉螺和海洋爬行类等都先后灭绝了, 但水母却生存了下来, 并且仍然是海洋中的主要生物类群之一。

水母具有世代交替的繁殖特性, 水母体在海洋中营自由生活, 通过有性繁殖产生浮浪幼体, 沉到海底变态为水螅体。水螅体生活于海底, 营底栖生活, 其水螅体通过多种无性繁殖方式进行繁育, 包括横裂生殖、出芽生殖和足囊生殖等。水螅体的无性繁殖方式取决于环境条件的变化, 这对揭示水母暴发机理来说至关重要。

1 关键科学问题与研究策略

在水母研究过程中, 人们最关心的科学问题简单来说主要是下述两个方面:

一是海洋中的水母为什么会出现数量增多、甚至出现泛滥成灾的现象? 是什么原因导致了水母数量增多? 是全球气候变化还是人类活动引起的?

二是水母数量增多对海洋生态系统的影响, 水母是否会成为海洋生态系统中的主导性生物, 从而改变海洋生态系统的结构与功能? 这些变化对渔业资源、海洋生物地球化学循环等会产生什么影响?

针对上述几个关键科学问题, 在研究策略上首先必须弄清水母的生活史策略, 特别是水螅体阶段, 它们的分布范围、数量变动、生殖方式等与环境变化之间的关系, 这对于了解水母暴发的发源地、导致水母暴发的原因等问题非常重要。对于水母暴发机理的认识, 必须针对环境因子变动对水母生活史不同阶段的影响、特别是对水螅体繁殖方式的影响进行实验生物学和生态学研究, 根据这些研究基础来解析在自然环境中水母暴发的机理。其次是探讨水母暴发与海洋食物网变动之间的关系: 没有充足的饵料, 水母种群不可能得到补充和壮大, 而在水母暴发之后又会对食物网造成很大影响。第三个关键内容是研究水母与其它生物之间的相互关系: 水母的数量增多是否是由于敌害生物或者与之进行食物和空间竞争的生物数量减少的结果, 同时要研究水母数量的增多对其它生物会造成什么影响。水母种群的暴发应该满足三个方面的条件: 高繁殖率、高生长率和低死亡率。其中高繁殖率主要与水母生活史策略、特别是生活在海底的水螅体阶段的无性繁殖策略密切相关;

高生长率的关键是必须能够获得足够的食物; 满足低死亡率的一个重要的条件是敌害生物(能够摄食水母的生物)的数量要少。要回答上述问题, 首先要进行大量的活体培养和实验生态学实验, 同时进行大量的海上调查, 建立水母暴发概念模型, 并通过一系列的实验和考察数据进行检验和修正, 建立水母暴发机理的理论体系和预测模式。

2 研究进展

2.1 水母生活史

对在我国近海出现的灾害性水母——沙蜃(*Nemopilema nomurai*)、白色霞水母(*Cyanea nozakii*)和海月水母的生活史进行了综合实验、观察和野外调查。沙蜃是在我国近海暴发的重要灾害性水母之一, 也是世界上最大的水母之一, 成体水母直径可达 2m, 体重 200kg, 沙蜃的暴发对滨海旅游、渔业和工业活动以及海洋生态系统产生重要影响。长期以来, 由于沙蜃的个体巨大, 培养困难, 因此人们对沙蜃的生活史策略了解得比较少, 特别是水螅体阶段的发育过程。本项目组利用自然获得的沙蜃亲体获得大量水螅体, 在实验室对水螅体的发育和变态过程进行了观察和研究, 对沙蜃水螅体阶段各期的发育时间和形态特征进行详细的观察和记录, 同时对沙蜃、海蜇和白色霞水母的发育过程进行了比较研究, 为了解自然状态下大型水母种群生长和暴发研究打下了良好的基础。

海月水母是一个广布种, 是在近岸水域最常见的一种水母, 海月水母的暴发往往对海边的核电设施、电厂、海水淡化厂和化工厂的冷却系统造成破坏。海月水母也是世界上被研究最多的水母, 在前人已有研究的基础上, 作者对海月水母开展了广泛的研究, 特别是重点开展了生活史阶段的研究。大量的实验表明: 海月水母能够在温度适宜(15℃)、饵料充足的条件下持续不断地产生水母体, 在 10℃以下的环境中, 水螅体生长缓慢, 饵料对水螅体的生长的调控作用相对较弱, 在 15℃以上的环境中, 饵料对水螅体的生长具有明显的调控作用, 在饵料充足的情况下, 水螅体能够通过出芽、足囊等无性繁殖方式产生新的水螅体, 但在饵料不足的情况下, 水螅体生长缓慢, 甚至出现死亡的现象。

温度和饵料的组合, 对水母生活史的发育方向起着重要的调控作用, 这方面的研究为人们了解在自然环境中水母种群暴发机理研究提供了重要的参

数和基础生态学方面的实验数据。

在自然海域中寻找水螅体非常困难。作者通过连续采样, 在青岛码头附近发现大量的海月水母碟状幼体, 而且在 5 月份持续时间非常长, 据此判断在码头附近存在大量的水螅体。在实验条件下, 作者使用塑料管、塑料波纹板、贝壳、水泥块、玻璃板等作为附着基观测水螅体的附着情况, 发现在这些硬的材质上水螅体都能够进行附着, 但塑料管相对附着的多一些。见图 1。

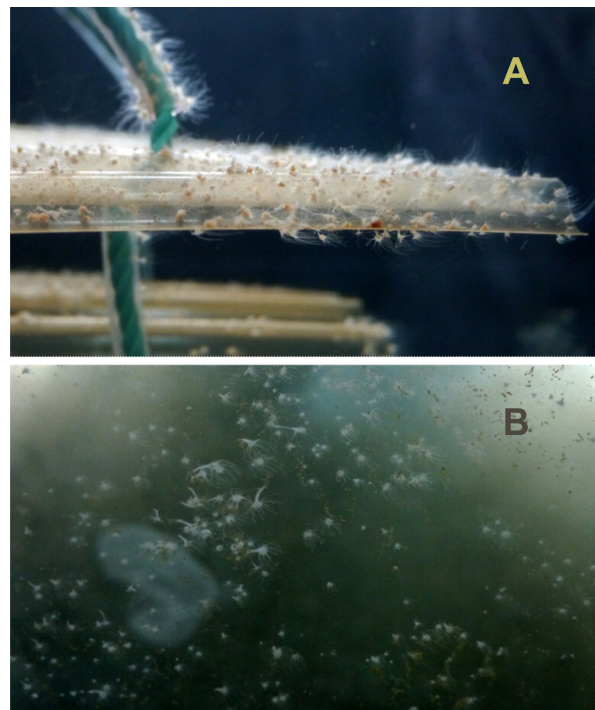


图 1 生活在塑料波纹板(A)和玻璃板上(B)的海月水母水螅体

Fig.1 Polyps of *Aurelia* sp.1 living on the plastic plate (A) and glass plate (B)

2.2 水母分布

水母的分布与风、海流、锋面和水团等的关系非常密切。作者通过大量的海上调查和质点追踪模拟等研究, 发现东海和南黄海是大型水母种群补充的重要来源, 在 4—5 月份能够发现小型水母, 在 6 月份开始出现 10—20cm 的沙蜃水母幼体。在 2011 年的海上现场调查发现, 7 月下旬在胶州湾中出现大量成体沙蜃和白色霞水母, 而在此之前在胶州湾中没有发现这两种水母的幼体, 因此在胶州湾中出现的沙蜃和白色霞水母可能不是本地产生的, 而是从外海漂进来的。通过质点追踪模式研究和物理过程方面的研究, 也初步证实了作者的推测。见图 2。

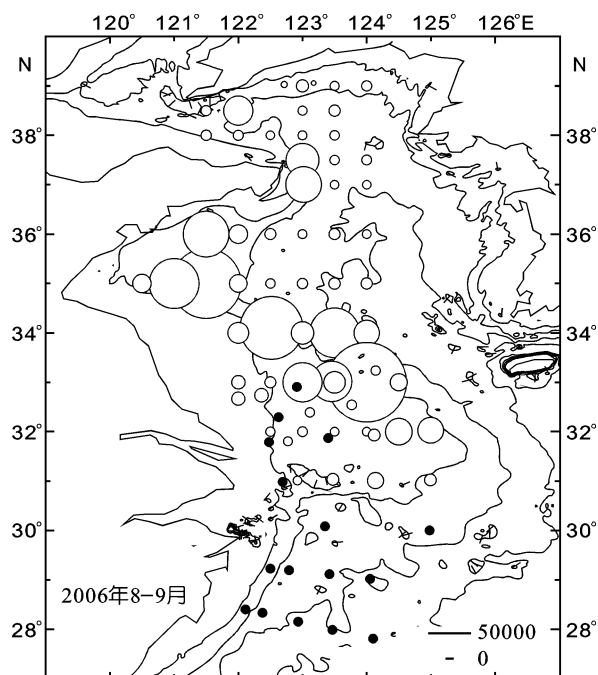


图2 黄、东海沙蜃空间分布格局(kg/km²)

Fig.2 Distributions(kg/km²) of *N. nomurai* in the Yellow Sea and East China Sea

注: 黑圆点表示没有出现沙蜃的站位

2.3 水母数量变化

Condon 等(2012)近期在 BioScience 上发表文章, 对水母是否在全球范围内数量增多、最终会成为生态

系统中的主导性生物提出了不同的见解, 认为目前没有足够的证据证明全球海洋中的水母在增多, 因为一些区域的水母数量的确在增加, 但也有一些区域水母的数量在减少。根据作者在胶州湾对小型水母的长期调查数据显示(缺乏大型水母考察资料), 胶州湾中的水母种类和数量的确在增加, 而且增加的幅度比较大。小型水母数量的增多对胶州湾生物多样性、生态系统的结构与功能等均产生了很大的影响(Sun *et al*, 2012)(图3)。

2.4 水母种群暴发与饵料生物相关关系

水母的暴发需要大量的饵料生物作为能量来源, 同时水母的暴发会对海洋食物网产生很大的影响。针对这两个方面的问题, 作者开展了水母对浮游动物摄食的实验, 证实水母对浮游动物存在过剩摄食的现象: 摄食的浮游动物数量超出其本身生长的需求, 水螅体能够摄食水体中的浮游植物, 二者之间具有很好的相关性, 这对认识水螅体的食物来源等具有重要的意义。作者同时开展了不同种类的水螅体和水母体之间的相互作用研究, 发现不同种类的水螅体和水母体之间存在捕食与被捕食的关系, 海月水母对海蜇幼体具有很强的捕食作用, 海月水母的水螅体也能够摄食其它种类水母的水螅体。

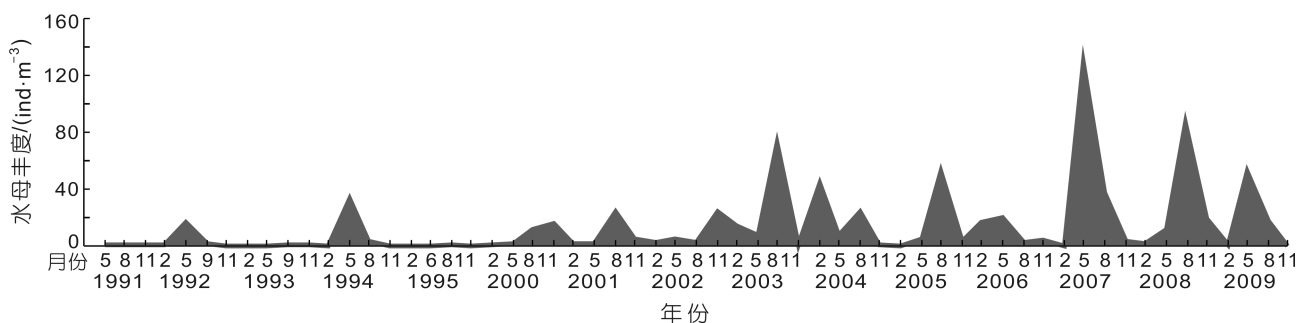


图3 胶州湾小型水母丰度长期变化(Sun *et al*, 2012)

Fig.3 Variation in the abundance of small jellyfish in Jiaozhou Bay (Sun *et al*, 2012)

3 下一步的研究

尽管作者已经进行了大量的室内模拟实验和大规模的海上现场考察, 但仍然不能满足对水母复杂生活史、生殖策略、种群暴发等方面的全面了解。在未来的几年中, 作者将继续水母生活史策略、水母发源地的追踪、水螅体分布范围和分布水层的探索、水母暴发与生态系统演变之间的相互关系等方面的研究。在水母生活史研究方面将继续探索水螅体在自然环境中的分布与温度、光照、深度等方面的关系, 水

母的种群暴发与温度、饵料间的关系; 继续开展我国近海水母暴发源地的探索, 通过实验模拟、现场调查和物理动力学过程等方面的综合研究, 查清主要灾害水母水螅体的生长环境与主要分布范围; 开展不同水母种间关系的研究, 水母的暴发与其它种类生物组成与数量变动之间的关系等。

参 考 文 献

Brodeur R D, Mills C E, Overland J E *et al*, 1999. Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering

- Sea, with possible links to climate change. *Fisheries Oceanography*, 8: 296—306
- Chen J Y, Schopf J W, Bottjer D J *et al*, 2007. Raman spectra of a Lower Cambrian ctenophore embryo from southwestern Shaanxi, China. *Proceedings of the National Academy of Science*, 104: 6289—6292
- Condon R H, Graham W M, Duarte C M *et al*, 2012. Questioning the rise of gelatinous zooplankton in the world's oceans. *BioScience*, 62(2): 160—169
- Hagadorn J W, Dott R H Jr, Damrow D, 2002. Stranded on a Late Cambrian shoreline: Medusae from central Wisconsin. *Geology*, 30: 147—150
- Jackson J B C, Kirby M X, Berger W H *et al*, 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293: 629—637
- Lotan A, Fine M, Ben-Hillel R, 1994. Synchronization of the life cycle and dispersal pattern of the tropical invader scyphomedusae *Rhopilema nomadica* is temperature dependent. *Marine Ecology Progress Series*, 109: 59—65
- Richardson A J, Bakun A, Hays G C *et al*, 2009. The jellyfish joyride: Causes, consequences and management responses to a more gelatinous future. *Trends in Ecology and Evolution*, 24: 312—322
- Schrope M, 2012. Marine ecology: Attack of the blobs. Jellyfish will bloom as ocean health declines, warn biologists. Are they already taking over? *Nature*, 482: 20—21
- Sun S, Li Y H, Sun X X, 2012. Changes of the small jellyfish community in Jiaozhou Bay, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 30(4): 507—518
- Uye S, Ueta U, 2004. Recent increase of jellyfish populations and their nuisance to fisheries in the Inland Sea of Japan. *Bulletin of Japanese Society of Fisheries Oceanography*, 68: 9—19
- Vinogradov M Y, Shushkina E A, Musayeva E I *et al*, 1989. A newly acclimated species in the Black Sea; the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* (Ctenophora: Lobata). *Oceanology*, 29: 220—224

PROGRESS IN THE JELLYFISH BLOOM RESEARCH IN THE YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA

SUN Song^{1,2}, YU Zhi-Gang³, LI Chao-Lun¹, HUANG Bang-Qin⁴,
ZHUANG Zhi-Meng⁵, WEI Hao⁶, SUN Xiao-Xia²

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 2. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071; 3. Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, 266100; 4. College of the Environmental and Ecology, State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen, 361005; 5. Yellow Sea Fisheries Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, 266071; 6. College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457)

Abstract Under the pressure of global changes and human activities, the structure and function of marine ecosystem changed significantly. The ecological disasters including red tide, green tide and white tide (jellyfish blooms) occurred frequently. As representatives of the gelatinous plankton, the increasing of jellyfish abundance caused much controversy and interpretation internationally: the outbreak of jellyfish is a trend or a cyclical phenomenon. The key question is the understanding of the cause of jellyfish bloom. To solve these problems, a comprehensive investigation was carried out on the basis of Major State Basic Research Development Program entitled “Key processes, mechanism and ecological consequences of jellyfish bloom in China coastal waters”. The research progress of the project will be published in this special issue. This progress is related to the jellyfish life history strategies, the impact of environmental factors on the growth and development of the different life history stages of jellyfish, the impact of jellyfish bloom on environment, as well as the new perception on the mechanism of jellyfish bloom in China coastal waters.

Key words Jellyfish bloom, Ecosystem dynamics, Ecological disaster